

프리캐스트 슬래브 궤도 시스템의 충전층 충전불량이 궤도구조물의 구조적 안전성에 미치는 영향

The effect of the poor infilling of the underpouring in precast slab track system on structural behavior

김유봉† 강영중* 문도영** 안기홍***
Kim, Yoo-bong Kang, Young Jong Moon, Do Young An, Ki-hong

ABSTRACT

It has been proved that precast slab track has advantage of rapid construction speed and good quality compared to in-situ concrete slab track. A korean precast slab track, which is named as a K-PST, was developed and had been installed on the embankment and explored on the air. The developed track system consists of precast track panel and underpouring layer which is made of cement-asphalt mortar. Consequently, poor filling of underpouring layer directly could affect on the long-term performance of the track system. As a preliminary study, the effect of the poor infilling of the underpouring in precast slab track system on structural behavior was investigated through FEM analysis.

1. 서론

최근, 효과적이고 경제적인 유지보수가 가능한 콘크리트 궤도는 자갈도상 궤도를 매우 빠르게 대체하고 있다. 우리나라 철도에서는 1990년대 초반부터 터널구간에 현장타설 콘크리트 도상궤도를 사용하고 있으며, 현장타설 콘크리트 궤도는 자갈도상 궤도에 비해 초기투자비는 고가이나 궤도강성의 증가로 인해 열차하중에 의한 궤도파괴를 획기적으로 감소시켰고, 이를 통해 유지보수작업과 보수비를 크게 감소시켰다. 그러나 현장에서 궤광조립 후 콘크리트 타설을 해야 하므로, 복잡한 시공공정과 오랜 시공기간, 현장타설 콘크리트의 균일한 품질 확보 등의 어려운 문제점 등이 발생하였다. 한편, 일본, 독일 등의 철도 선진국에서는 현장타설 콘크리트 도상궤도의 문제점을 개선하기 위해 이미 30년 전부터 공장에서 슬래브 패널을 제작하여 현장에서 조립하는 프리캐스트 슬래브궤도(Precast Slab Track System, PST-system)를 개발 사용하였으며, 그 효용성이 검증되고 있다. 이에 국내에서는 한국철도기술연구원과 삼표 E&C가 공동연구를 통하여 2006년 국내형 프리캐스트 슬래브 궤도를 개발하였다. 프리캐스트 슬래브궤도는 콘크리트 패널과 충전층, 콘크리트 기층으로 구성된다. 충전층은 시멘트-아스팔트 재료(Cement-Asphalt Mortar)로서, 콘크리트 기층과 패널사이에 시공되며, 시공상의 높이 오차를 보정하뿐만 아니라 패널과 콘크리트 기층을 구조적으로 일체화 시키는 매우 중요한 구조요소이다. 따라서 충전층의 시공품질은 장기적인 궤도시스템의 건전성을 담보하는 요소임에 틀림없다. 본 논문에서는 시공 불량에 의한 충전층의 충전 불량이 궤도구조물의 응력 및 변위거동에 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 고찰하였다. 그림 1은 국내형 프리캐스트 슬래브궤도의 구조를 설명하고 있다.

† 정회원, 삼표이앤씨(주), 기술팀, 과장
E-mail : kiddy72@sampyoenc.com
TEL : (02)460-7405 FAX : (02)460-7382
* 정회원, 고려대학교, 건축사회환경공학부, 교수
** 정회원, 경성대학교, 토목공학과, 전임강사
*** 정회원, 삼표이앤씨(주), 상무이사

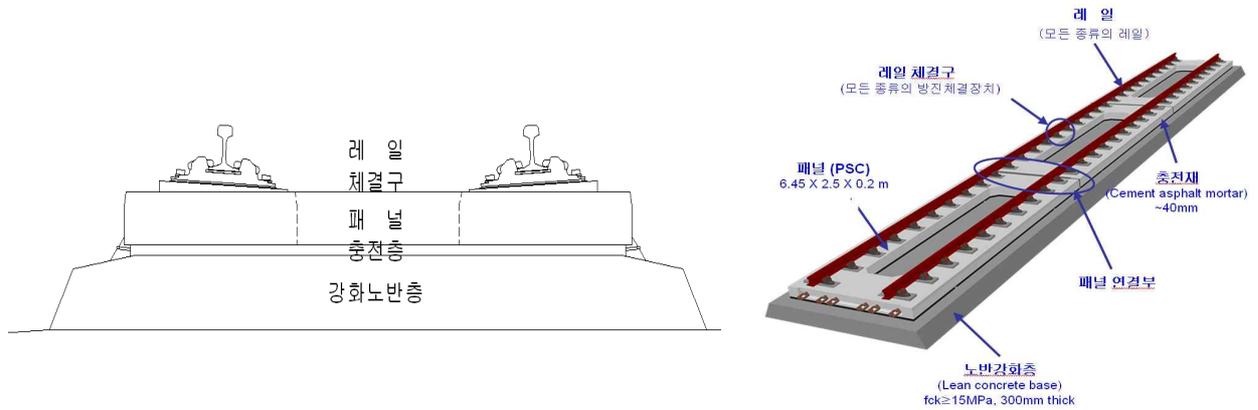


그림1. 국내형 프리캐스트 슬래브제도 구조개요

2. 유한요소해석 모델링

2.1 해석개요

본 연구에서 유한요소해석은 PST-system의 3차원 유한요소해석모델에서 충전층에 인위적인 충전불량(미충진부)을 모델링한 후 설계하중하에서의 정적해석결과를 응력과 변위로 나누어 분석함으로써 충전층의 충전불량이 PST-system의 구조거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수행되었다.

본 해석대상 구조는 국내형 프리캐스트 슬래브제도의 시험부설구간(전라선 서도-산성구간)에 시공된 PST-system A형으로 하였다. 유한요소해석모델은 프리캐스트 콘크리트 패널, 충전층과 안정화기층(일명 HSB층)을 포함하였으며, 그림 2와 같다. 모델링된 1개의 패널의 규격은 길이 6.45m, 폭 2.5m, 높이 0.2m이며, 유한요소모델은 5개의 패널을 포함하도록 하였으며, 단부영향을 최소화하기 위하여 안정화기층부를 각 단부로 5m씩 연장하여 모델링하였다. 모든 층에 사용된 요소는 8절점 solid 요소를 사용하였으며, 적용된 재료 물성치는 표 1과 같다.

표 1. 유한요소모델에 적용된 각층의 재료물성치

구분	재료	탄성계수	포이슨비	자중	열팽창계수
패널	콘크리트	33,728 N/mm ²	0.18	2,440 kg/cm ³	0.000012
충전층	CAM	4,800 N/mm ²	0.16	2,300 kg/cm ³	0.000012
HSB층	콘크리트	24,154 N/mm ²	0.18	2,300 kg/cm ³	0.000012

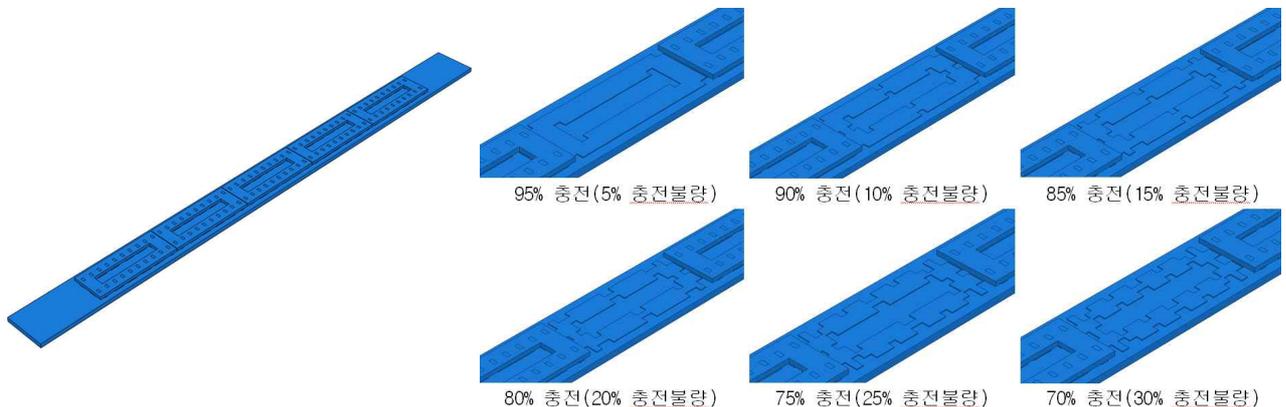


그림 2. PST 유한요소 모델

유한요소모델의 경계조건은 HSB층 하부 토노반 구간에 지지력을 모사하기 위하여 1방향 Spring요소를 사용하였으며, Spring 강성값은 계산결과를 근거하여, 각 Node 당 1,680 N/mm²를 사용하였다. 또한 수치오류를 방지하기 위해 HSB층 바닥면의 모서리 4점에 해당방향으로 구속조건을 입력하였다. 유한요소해석시 적용된 하중은 열차의 축중이며, 레일의 수직하중을 각각의 체결구 위치에 나누어 재하 하였다. 표 2는 L-22 하중이 레일을 거쳐 체결구에 재하 되는 수직 하중값을 나타내고 있다.

표 2. 체결구 위치에 재하 되는 수직하중값

체결구 위치	재하하중 (N/mm ²)						
P2_S5	8,620	P2_S10	-732,760	P3_S5	-1,094,830	P3_S10	-51,720
P2_S6	25,860	P3_S1	-1,060,340	P3_S6	-1,051,720	P4_S1	34,480
P2_S7	43,100	P3_S2	-1,017,240	P3_S7	-1,034,480	P4_S2	34,480
P2_S8	-8,620	P3_S3	-1,120,690	P3_S8	-887,930	P4_S3	17,240
P2_S9	-250,000	P3_S4	-991,380	P3_S9	-379,310		

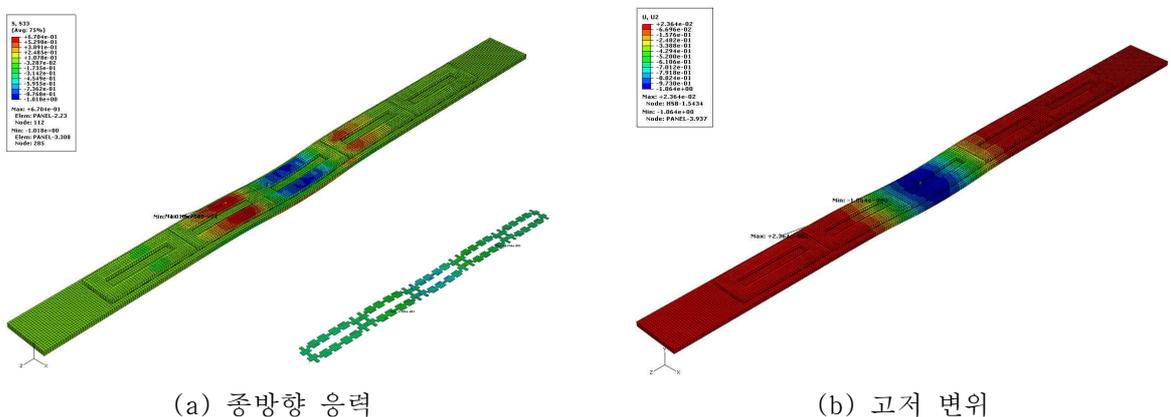
* Pno : 패널 번호, Sno : 체결구 번호

2.2 PST 유한요소모델 및 미충전부 모델링

미충전부를 모델링하는 방법은 여러 가지가 있겠으나, 본 해석에서는 요소제거방법을 이용하였다. 즉, 모델링시 충전층의 일부를 일정 비율만큼 제거하는 방법으로 충전상태가 불량한 충전층의 형상을 모델링 하였다. 충전율은 5%씩 감소시켜 70%까지 낮추었다. 그림 2에 오른편 하단에 그림은 PST 1개의 패널을 제거한 그림으로써, 각 비율에 따른 미충전부를 나타내고 있다.

3. 해석결과

본 연구의 해석결과는 HSB층, 충전층 및 Panel 각층의 종방향 응력, 횡방향 응력과 고저변위에 대한 결과를 고찰하였다. 모델전체의 70% 미충전의 해석결과 도출된 종방향 응력도 및 고저변위에 대한 변형도는 그림 3과 같다. 그림과 같이 하중이 집중되는 부위에 하향 변위가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 3번째 위치하는 패널의 상부는 압축응력을 2번째와 4번째 위치한 패널의 상부에는 인장응력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 전체적 거동해석 결과는 예측된 변형거동을 보여줌으로써, 해석결과가 적절하였음을 나타낸다.



(a) 종방향 응력 (b) 고저 변위
그림 3. 전체모델의 응력도 및 변위도 결과 (CAM 충전율 70%)

3.1 콘크리트 패널의 응력 및 변형 결과

그림 4는 콘크리트 패널의 해석결과를 나타내고 있다. 그림과 같이 패널에 발생하는 종방향 인장 응력값은 1MPa 이하로 미미한 수준임을 확인할 수 있다. 또한 1mm 정도의 고저변위가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5는 충전율에 따른 패널의 응력변화를 나타내고 있다. 제시된 그림과 같이 충전율이 저하될수록 응력값이 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한 충전율이 85%이하가 될 때 급격한 응력의 변화가 있음을 확인할 수 있다.

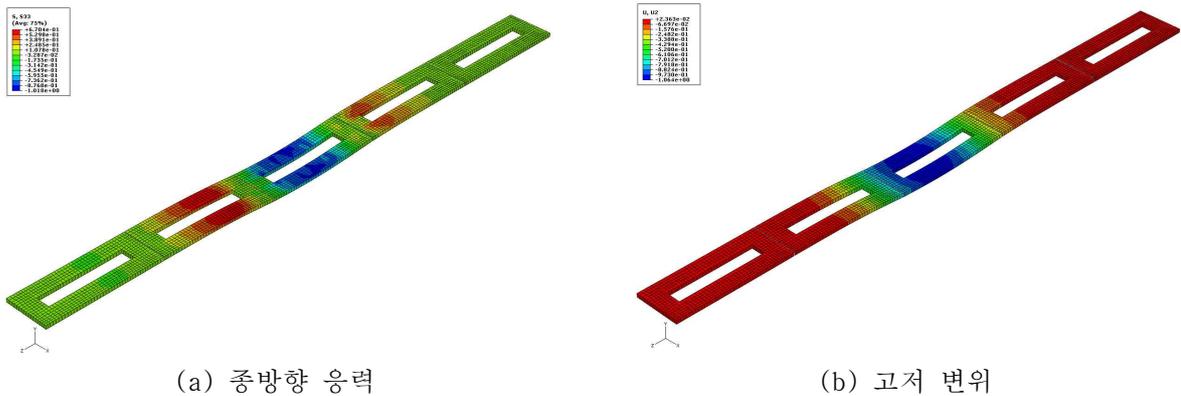
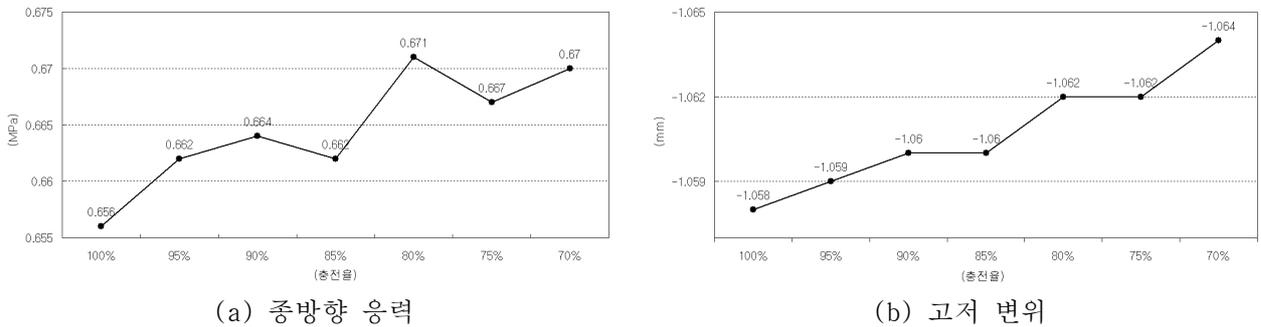


그림 4. 콘크리트 패널 해석결과 (CAM 충전율 70%)



(a) 종방향 응력

(b) 고저 변위

그림 5. 충전율에 따른 패널의 응력변화

3.2 충전층의 응력 및 변형 결과

그림 6은 충전층이 해석결과를 나타내고 있다. 그림과 같이 충전층에 발생하는 종방향 인장응력값은 0.3MPa로 매우 작으며, 이는 충전층의 강성이 패널에 비하여 작기 때문이다. 충전층의 변위는 충전율이 70%일지라도 패널의 변위와 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그림 7은 충전층의 충전율 변화에 따른 응력의 변화를 나타내고 있다. 변화양상은 패널과 유사하며, 85% 충전율 이하가 될 때, 응력의 변화가 커짐을 확인할 수 있다.

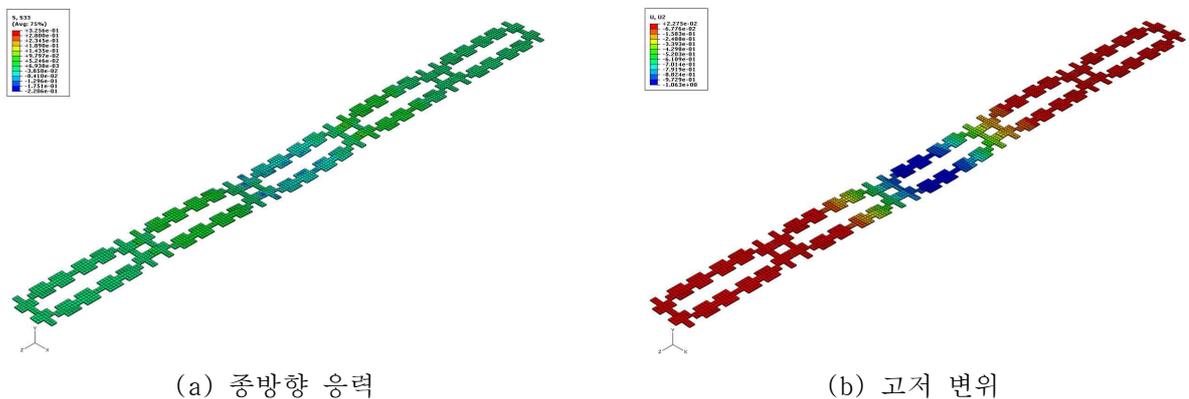
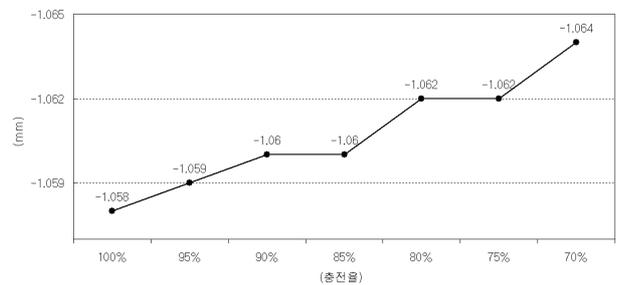
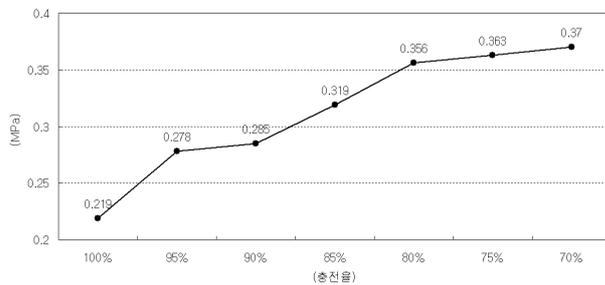


그림 6. 충전층 해석결과 (CAM 70% 충전)



(b) 종방향 응력

(c) 고저 변위

그림 7. 충전율에 따른 충전층 응력변화

3.3 해석결과 비교 평가

표 3은 CAM의 충전율이 70%일때 응력 및 변위값을 정리하여 설계치와 비교하여 제시하고 있다. 제시된 표와 같이 발생하는 응력은 설계값 이하로 나타났다. 따라서 개발된 프리캐스트 슬래브 궤도는 충전층의 시공시 다소의 미충전 부위가 있다고 하더라도 구조적 여유도가 충분한 것으로 판단된다.

표 3. 체결구 위치에 재하 되는 수직하중값

충전율	Layer	응 력 (MPa)				고저 변위 (mm)
		횡방향		종방향		
		기 준	계산값	기 준	계산값	
70%	Panel	2.95	0.177	1.72	0.670	-1.064
	충전층	1.90	0.241	1.90	0.326	-1.063
	HSB층	1.90	0.318	1.90	0.629	-1.063

4. 결론

본 논문에서는 국내에서 개발한 프리캐스트 슬래브궤도에 시공되는 충전층의 충전불량이 슬래브 패 널의 응력 및 변위거동에 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 고찰하였으며, 응력 및 변위결과를 설 계기준치와 비교하여 고찰하였다. 본 연구를 통해 획득된 결과는 다음과 같다.

- (1) 충전층이 미충전부가 증가할수록 패널 및 충전층의 종방향 인장응력은 증가한다.
- (2) 패널 및 충전층에 발생하는 응력의 수준은 0.3MPa~0.6MPa로 설계값 보다 크게 작은 것을 확인 하였으며, 충분한 구조성능을 보유하고 있는 것으로 판단된다.
- (3) 그러나, 충전층 충전불량 부위에 수분 등이 침투될 경우 동결융해 작용 등에 의하여 장기적으로 충전층이 파손될 우려가 있기 때문에 시공에 만전을 기해 미충전부가 발생하지 않도록 하여야 한다.

참고문헌

1. 서사범, “궤도역학 2-콘크리트궤도의 역학,” 철도 정책의 진단과 과제,” 북갤러리, 90권, 1호, pp.15-31.
2. 장승엽, 양신추 김정일 김태욱, “프리캐스트 콘크리트 슬래브궤도 기술현황, “ 한국철도학회 2003년 추계학술대회 논문집, 2003
3. 이창호, “철근 콘크리트 슬래브 궤도 패널의 구조설계기법에 관한 연구, “ 2004